

基于各向异性介质的偏振分束器*

黄弼勤 杨立功 陈海星 沈伟东 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 利用各向异性介质与各向同性介质构造了一维光子晶体, 利用传输矩阵方法分析了它的能带结构, 指出利用各向异性介质可以构造高消光比, 全角度的偏振分束器件, 并分析了它的理论基础. 对影响偏振分束带宽的因素进行了分析. 为进一步改进设计提出了方向.

关键词 偏振分束器; 一维光子晶体; 禁带

中图分类号 O734 **文献标识码** A

0 引言

基于薄膜的偏振分束器件在现代光学中有广泛应用, 特别是在各种投影显示以及偏振转换器件中有重要的应用, 现有的各种偏振器件多是基于 Brewster 角时 p 光透射的原理, 通过增大 s 光的反射率以达到高的消光比^[1], 也有是利用倾斜入射时有效折射率不同构成平板的偏振片. 为了获得宽角度、高消光比的偏振分束器, 提出了很多的改进方法^[2,3]. 但是这些方法都要求斜入射, 同时带宽和角度上有诸多的限制.

90 年代以来, 光子晶体的发展使得很多新颖的器件得以实现, 包括波导, 波分复用器件等等^[4]. 这些器件都要求具有与入射光偏振无关的光子禁带. 对二维或者一维光子晶体来说为了获取满足要求的禁带, 总是需要使得 TE 和 TM 模式的禁带重合. 由于二者的分离在很大程度上限制了宽波段禁带的获得, 所以需要采用各种方法保证二者重合, 然而对偏振分束器件来说, 恰恰需要避免两种偏振模式光能带的重合, 如果能够通过适当的设计, 改变两种模式下的能带结构, 就有可能制作良好的偏振分束器件. 因为如果使得在一定频率范围内的 TE 或者 TM 光透过光子晶体, 而另外一个反射, 就能获得极高的消光比. 同时这种器件尺寸很小, 易于集成, 在光子集成中能发挥重要的作用. 而且, 通过适当的设计很容易展宽偏振分束器的带宽. 二维光子晶体在垂直入射时的偏振分束器件已经得到实现^[5], 为新的偏振器件的设计和应用提供了便利. 但是, 基于二维光子晶体的器件, 工艺复杂, 同时带宽也有限. 对入射光的范围也有一定限制.

本文对基于一维光子晶体的偏振分束器件进行

了分析, 利用各向异性介质设计了全角度的偏振分束器. 并对影响带宽的因素进行了分析.

1 一维偏振分束器件的理论基础

一维光子晶体的能带结构可以通过传输矩阵分析所得. 当高、低折射率分别为 2.4 与 1.46, 填充率(高折射材料与周期的厚度比)为 1/3 时的能带结构如图 1 所示. 其中 k_x 大于零部分对应 TE 模式, 小于零对应 TM 模式. 可以看出, 由于垂直入射时 TE 与 TM 波的能带重合, 因此不可能存在垂直入射的偏振分束器. 同时, 虽然可以利用在某一入射角度下, TE 或者 TM 位于禁带之内而得到极高的消光比, 但是工作的角度范围非常狭小, 没有实际用途. 分析一维光子晶体与二维光子晶体的差别可以看出, 一维情况下不能获得垂直入射的根本原因是垂直入射时 TE 和 TM 模的禁带完全重合, 而二维光子晶体在垂直界面入射时, 两种模式的光对应的晶体空间结构的不同引起了能带的分离, 因此可以获得垂直入射时的偏振分束特性^[5].

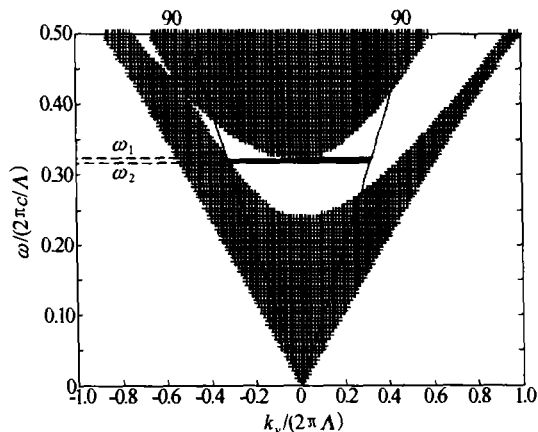


图1 角频率与波矢量切向分量关系
Fig. 1 The relation between angular frequency and the tangential component of wave vector

上述讨论都只考虑构成光子晶体材料为各向同性的情况. 如果在光子晶体中引入各向异性的介质, 由于材料的各向异性, 为光子晶体的设计引入了

*国家自然科学基金资助项目(60078001)
Email: htwoohbq@hotmail.com
收稿日期: 2003-04-10

额外的自由度,因此可更加容易改变光子晶体的能带结构,从而获得较大的禁带^[6,7]. 将其用于一维光子晶体,也能够有效地获得较宽的全方位反射带. 最初引入各向异性材料的目的是为了克服各向同性材料构成的光子晶体禁带分离. 而为了实现垂直入射时的光子晶体偏振分束器,最直接的方法是促使两种模式对应禁带的分离,两者之间分离的越厉害,就越有可能获得高性能的偏振分束器. 各向异性材料提供额外的折射率自由度,恰好可以用来实现这个目的.

如图 2 所示,由各向异性介质与各向同性介质

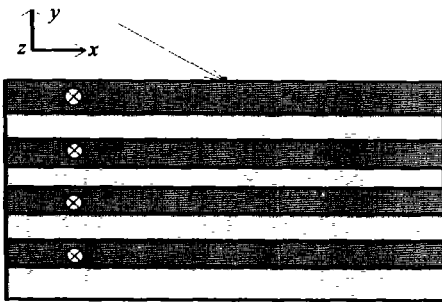


图 2 一维光子晶体示意图
Fig. 2 The scheme of one-dimensional photonic crystal discussed in this paper

交替构成了一维光子晶体. 其中各向异性介质为单轴晶体. 光轴如图 ⊗ 所示,相对各向同性介质为高折射率. 假定各向异性介质的折射率分别为 n_e 和 n_o . 各向同性介质折射率为 n . 对于一般的一维光子晶体可以通过角频率和波向量的色散关系计算禁带

$$\cos K\Lambda = \cos(k_{1x}a)\cos(k_{2x}b) - M\sin(k_{1x}a) \cdot \sin(k_{2x}b) \quad (1)$$

$$M \equiv \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{k_{2x}}{k_{1x}} + \frac{k_{1x}}{k_{2x}} \right) & \text{TE} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2 k_{2x}}{n_2^2 k_{1x}} + \frac{n_2^2 k_{1x}}{n_1^2 k_{2x}} \right) & \text{TM} \end{cases} \quad (2)$$

式中, n_2, n_1 分别为构成一维光子晶体的材料折射率, k_{1x} 和 k_{2x} 分别为相应介质中波矢量的法向分量. K 为 Bloch 波矢量, Λ 为光子晶体周期. a, b 为相应介质的物理厚度. 这个色散关系是针对各向同性介质材料的. 在本文中,由于引入了各向异性介质材料,所以必须有所改变.

假定入射光限制在 xoy 平面,则任意角度入射的光波可以分解为 TE(电场矢量平行于 z) 和 TM(磁场平行于 z) 两种模式. 对于 TE 光,由于电场与各向异性介质的光轴平行,对应的折射率为 n_e . 而对于 TM 光,电场始终垂直于光轴,因此对应的折射率为 n_o . 所以,式(2)必须修改为

$$M \equiv \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{k_{2x}}{k_{1x}} + \frac{k_{1x}}{k_{2x}} \right) & \text{TE} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{n_o^2 k_{2x}}{n^2 k_{1x}} + \frac{n^2 k_{1x}}{n_o^2 k_{2x}} \right) & \text{TM} \end{cases}$$

$$k_{1x} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{n_e \omega}{c} \right)^2 - (k_y)^2} & \text{TE} \\ \sqrt{\left(\frac{n_o \omega}{c} \right)^2 - (k_y)^2} & \text{TM} \end{cases} \quad (3)$$

$$k_{2x} = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{n\omega}{c} \right)^2 - (k_y)^2} & \text{TE} \\ \sqrt{\left(\frac{n\omega}{c} \right)^2 - (k_y)^2} & \text{TM} \end{cases}$$

从式(3)可以看出,由于介质材料的各向异性,在垂直入射时,角频率与波向量的色散关系不再一致,从而产生禁带的分离,导致偏振分束. 同时,通过引入不同的各向异性介质,可以相对自由地改变 TE 和 TM 模式光对应的能带结构,使二者发生较大地分离,从而可以获得全角度、高消光比的偏振分束性质.

2 能带结构的数值分析

根据以上分析,容易获得基于各向异性介质材料的光子晶体的能带结构. 为了说明问题,假定 n_e, n_o 分别为 4.6 和 4.0,高折射率材料物理厚度与一维光子晶体的周期比值为 1/3,各向异性介质材料的光轴如图 2 所示,各向同性介质折射率为 1.6. 计算得到的能带结构示于图 3. 横坐标为波矢量的切向分量,纵坐标为角频率. 波矢量的切向分量大于零的部分对应 TE 模式,小于零部分对应 TM 模式. 从图中可以看出,由于材料的各向异性,TE 与 TM 模式的能带发生了漂移,在垂直入射时,TE 和 TM 的禁带不再一致. 如图所示,对于 TE 光 ω_2 到 ω_4 对应于全角度禁带, ω_1 到 ω_2 对应于部分角度的反射带,在这个范围内的频率只有在某些角度范围内才有高反射. 对于 TM 光 ω_3 到 ω_4 对应于部分角度的反射带,而 ω_1 到 ω_3 对应于全角度透射带,在这个范围内的频率在全角度范围内都有一定的透射率. 可以看到,如果入射的 TE 模式的偏振光位于全角度禁带之内,而 TM 模式的偏振光位于全角度的透射带之内. 则理想情况下这些频率的光在全角度范围内的透射光束中将不存在 TE 模式的光. 因此即使在 TM 模式透射率不高的情况下依然也能获得很高的消光比,从而构成全角度偏振带($\omega_3 - \omega_2$). 当然,实际中,可以在这样的偏振器件上增加增透膜系

或者选择透射率高的频率甚至优化各层介质的厚度,提高器件透射光束和反射光束的消光比.对于一定频段,如果对应的TM或者TE的能带为部分角度的反射带,则不能获得全角度的偏振分束特性.最多只能获得一定角度下的偏振分束特性,但是此时器件的角度工作范围比较狭小.由式(1)和(3)可以得到此结构的全角度偏振带为0.1364至0.1501(已经用 $2\pi c/\lambda$ 进行归一化,其中 c 为真空中的光速),则相对带宽为9.56%.取各向异性介质与各向同性介质的物理厚度分别为30、60 nm,周期数为9,计算入射角度为 0° 和 85° 时一维光子晶体的反射率如图4所示,图4(a)为TE光反射率,图4(b)

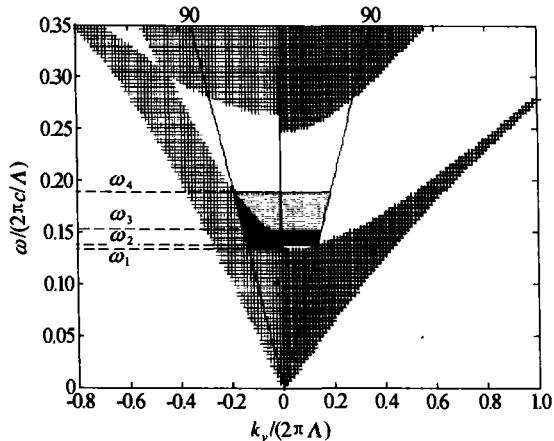


图3 各向异性一维光子晶体角频率与波矢量切向分量关系图

Fig. 3 The relation between angular frequency and tangential component of wave vector for one-dimensional photonic crystal with anisotropic materials

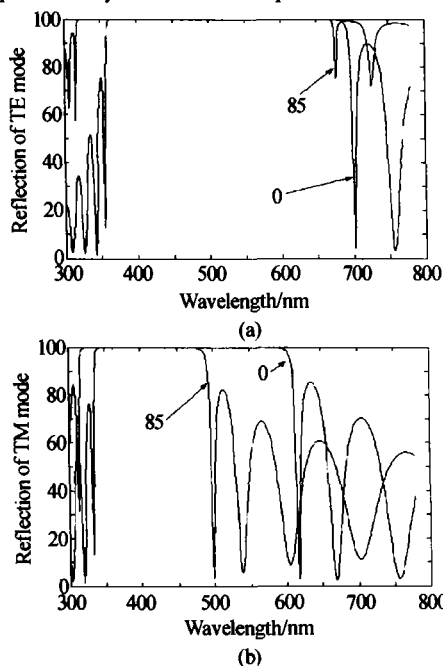


图4 一维光子晶体TE(a)、TM(b)光的反射率,入射角为 0° 、 85°

Fig. 4 The reflection of TE (a) and TM (b) of one-dimensional photonic crystal with incident angle 0° and 85°

为TM光反射率.若取反射率99%以上为全反射.则对于TE光全角度反射带为361~669 nm,而对于TM光垂直入射时反射带的上边界为601 nm,则可以得到,全角度偏振带为601~669 nm,相对带宽约为10.71%,与理论设计很接近,产生偏差的原因主要是有限周期结构以及基板带来的影响.同样可以看到,由于在全角度偏振带中,TM光靠近反射带,因此虽然消光比很高,但是透射率不是很高.要解决这个问题可以通过在一维光子晶体的基础上增加增透膜系,或者选取适当的各向异性介质,使得全角度偏振带位于TM光透射率较高的位置.另一个有效的方法就是优化各介质层的厚度.

上述的讨论主要针对全方位反射带的下边界,容易知道,在上边界,一样也可以存在全角度偏振分束频带,只是要求介质的 n_o 大于 n_e .从图3可以看出,为了获得全角度偏振,必须使得TE模式的全角度反射带的下边界低于TM模式垂直入射时反射带的下边界,即 ω_3 小于 ω_2 .而要在全方位反射带的上边界获得全角度偏振的性质,必须使得TE或者TM的全方位反射带的上边界大于TM或者TE光掠入射时反射带的上界.一般来说,由于这两者之间相差较大,因此在全方位反射带的下边界获得全角度偏振相对容易一些,对各向异性介质材料的折射率差 $\Delta n(n_e - n_o)$ 的要求也比较低,故以后的讨论都只针对在全方位反射带的下边界.图5描述了全方位偏振带的相对带宽(偏振带上下界的差值与偏振带中心的比值)随各向异性介质折射率差的变化,其中各向同性介质折射率取1.46.曲线1对应的各向异性介质的 n_e 为2.4,曲线2和3则分别为2.6和2.8.各向异性介质物理厚度与周期的比值为1/3.可以看到,只有折射率差达到一定值后才存在全角度偏振带.而且是随着差值的增大而增大.随着各向异性介质材料 n_e 折射率的提高,所要求的折射率差也逐渐降低.但是,其偏振带宽随折射率差的增幅却变小.因此实际设计中,并非折射率差越大越好,需根据要求选用适当的各向异性介质.同样,当材料选定之后,全角度偏振带宽与一维光子晶体的填充率有关.图6给出了全角度偏振带相对带宽与填充率 f (各向异性材料厚度与周期比值)的关系.其中曲线1对应的 n_e 为3.2,曲线2、3对应的 n_e 分别为3和2.8. n_o 为2.4,各向同性介质折射率为1.46.从图中可以看出,在某一个特定的填充率时,有最大的偏振带宽.在过极大值之后,相对带宽明显下降,主要是由于TE光的全角度反射带都位于TM光的全角度透射带之中,带宽主要由TE的全角度反射带决定.随着填充率的进一步提高,TE的全

角度反射带下降很快,从而引起了全角度偏振带宽的下降.

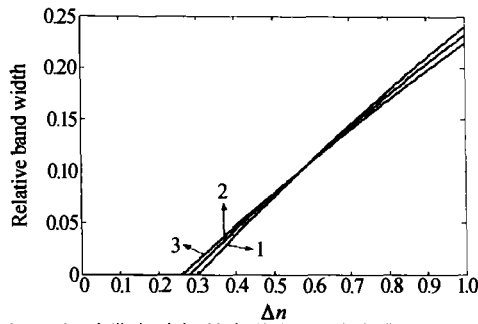


图5 相对带宽随折射率差(Δn)的变化

Fig. 5 The relation between relative band width and difference of refractive index (Δn)

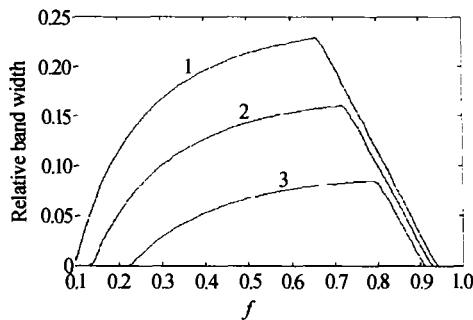


图6 相对带宽随填充率(f)的变化

Fig. 6 The relation between relative band width and filling ratio (f)

3 结论

分析了利用各向异性介质与各向同性介质交替构成的一维光子晶体的能带结构. 从一维光子晶体

能带的角度,分析了产生全角度、高消光比的偏振分束器的理论基础. 并对影响全角度偏振带带宽的因素进行了分析. 为设计高性能的偏振分束器件提供了一条有效的途径.

参考文献

- 1 Li Li, Dobrowolski J A. Visible broad-band, wide-angle thin film multiplayer polarizing beam-splitter. *Applied Optics*, 1996, **35**(4):2221
- 2 Li Li, Dobrowolski J A, Sullivan B T, et al. Novel thin film polarizing beam-splitter and its application in high efficiency projection displayer. *SPIE*, 1999, **3634**
- 3 章岳光, 盛永江, 艾曼灵, 等. 宽波段宽角度偏振分束薄膜. *光学仪器*, 2001, **23**(5-6):198~201
Zhang Y G, Sheng Y J, Ai M L, et al. *Optical Instrument*, 2001, **23**(5-6):198~201
- 4 Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. *Photonic Crystals: Molding the flow of light*, 1995, Princeton, Princeton University Press
- 5 Ohtera Y, Sato T, Kawashima T, et al. Photonic crystal polarization splitters. *Electronics Letters*, 1999, **35**(15):1271~1272
- 6 Li Zhi Yuan, Wang Jian, Gu Benyuan. Creation of partial band gaps in anisotropic photonic-band-gap structure. *Physical Review(B)*, 1998, **58**(7):3721~3729
- 7 Li Zhiyuan, Gu Benyuan, Yang Guozhen. Large absolute band gap in 2D anisotropic photonic crystals. *Physical Review Letters*, 1998, **81**(12):2574~2577

Polarization Beam Splitter Based on Anisotropic Materials

Huang Biqin, Yang Ligong, Chen Haixing, Shen Weidong, Gu Peifu

State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,

Yugu Road, Hangzhou, 310027, People's Republic of China

Received date:2003-04-10

Abstract One dimensional photonic crystal consisting of materials with anisotropic refractive index and isotropic refractive index is design. The photonic band structure is analysed by using transfer matrix method. It indicates that this type of structure can be used to fulfil the polarization beam splitter for all angles from 0 to 90 degree. The parameters affecting the bandwidth of this kind of polarization beam splitter are analysed.

Keywords Polarization beam splitter; One dimensional photonic crystals; Forbid band

Huang Biqin Got his bachelor degree in Optical Engineering Department of Zhejiang University. Now he is a Master candidate at Optical Engineering Department. His research areas cover theory and application of photonic crystals and thin film technology.

